

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于干扰精细估计与神经网络推力分配的载人潜水器控制

浦吉铭, 方星, 刘飞, 高翔

引用本文:

浦吉铭, 方星, 刘飞, 高翔. 基于干扰精细估计与神经网络推力分配的载人潜水器控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(11): 3290–3296.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0155>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制](#)

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint  
*控制与决策*. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

#### [四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制](#)

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV  
*控制与决策*. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

#### [输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制](#)

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation  
*控制与决策*. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

#### [基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制](#)

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law  
*控制与决策*. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

#### [基于时变增益ESO的航天器无源姿态跟踪控制](#)

Passive attitude tracking control of spacecraft based on time-varying gain ESO  
*控制与决策*. 2018, 33(2): 193–202 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1472>

# 基于干扰精细估计与神经网络推力分配的载人潜水器控制

浦吉铭<sup>1</sup>, 方星<sup>1,2†</sup>, 刘飞<sup>1</sup>, 高翔<sup>3</sup>

(1. 江南大学轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏无锡 214122; 2. 无锡气动技术研究有限公司, 江苏无锡 214072; 3. 国家深海基地管理中心, 山东青岛 266237)

**摘要:** 针对潜水器在水下运行时会受到洋流、参数摄动等多种干扰因素影响和潜水器的过驱动问题, 设计一种基于干扰观测的反步控制器和基于神经网络二次规划的推力分配器的双层控制结构. 首先, 建立潜水器系统在洋流影响下的动力学模型; 其次, 将潜水器受到的干扰分为由洋流产生的干扰和由其他因素引起的干扰两部分, 分别使用洋流观测器和非线性干扰观测器进行估计, 并基于干扰观测信息利用反步法设计运动控制器; 然后, 针对潜水器的过驱动特性以及推进器的推力受限问题, 提出一种基于神经网络二次规划的推力分配方法; 最后, 使用 Matlab 进行数值仿真, 验证所提控制方法的有效性和优越性. 结果表明, 基于干扰精细估计与神经网络推力分配的潜水器运动控制系统具有干扰估计更加准确、推进系统的耗能最优, 以及避免推进器的推力超限等优势.

**关键词:** 抗干扰控制; 非线性干扰观测器; 洋流观测; 神经网络; 推力分配; 载人潜水器

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0155

引用格式: 浦吉铭, 方星, 刘飞, 等. 基于干扰精细估计与神经网络推力分配的载人潜水器控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3290-3296.

## Manned submersible vehicle control based on refined disturbance estimation and neural network thrust allocation

PU Ji-ming<sup>1</sup>, FANG Xing<sup>1,2†</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, GAO Xiang<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry of Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Wuxi Pneumatic Technical Research Institute Co., Ltd., Wuxi 214072, China; 3. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the manned submersible vehicle is affected by ocean currents and over-actuated characteristics, a double-layer control structure is proposed for the manned submersible vehicle. First of all, a six-degree-of-freedom dynamic model of the manned submersible vehicle system under the influence of ocean currents is established. Secondly, the disturbances of the submersible vehicle are divided into two parts: the disturbance caused by ocean currents and other disturbances. The ocean current observer and nonlinear disturbance observer are designed to estimate the ocean current disturbance and other disturbances, respectively. Based on the estimated disturbance information, a motion controller is designed using the back-stepping algorithm for the manned submersible vehicle. Then, a thrust allocation method based on neural network quadratic programming is proposed to address the over-actuated problem, as well as to meet the thrust constraints of the manned submersible vehicle. Finally, some numerical simulation results are given to demonstrate the effectiveness and superiority of the proposed control scheme. The superiorities of the proposed control scheme based on refined disturbance estimation and neural network thrust allocation are threefold: its capabilities to obtain more accurate disturbance estimation result, to achieve the optimal energy consumption, and to prevent the thrust exceeding the limit.

**Keywords:** disturbance-rejection control; nonlinear disturbance observer; ocean current observation; neural network; thrust allocation; manned submersible vehicle

## 0 引言

潜水器是海洋勘探与开发的重要工具<sup>[1]</sup>, 能够在复杂海洋环境下完成多种任务. 在执行任务的过程

中, 通常需要对潜水器进行轨迹跟踪控制, 而复杂的水下环境、潜水器的模型不确定性和未建模动态等因素都会对潜水器的跟踪性能产生影响<sup>[2]</sup>. 因此, 如

收稿日期: 2022-01-22; 录用日期: 2022-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803182); 中国博士后科学基金项目(2021M702505).

†通讯作者. E-mail: xingfang@jiangnan.edu.cn.

\*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

何有效处理潜水器系统的各类干扰是潜水器控制技术中的一个重要环节。

潜水器在运行过程中会受到多种干扰因素的影响,针对该问题,目前常用的控制方法包括滑模控制、自适应控制和模糊控制等。滑模控制的突出特点是滑动模态对系统摄动和外部干扰的不变性,缺点是存在由切换控制引起的抖振现象。文献[3]中设计的自适应模糊滑模控制方法能够保证轨迹跟踪的稳定性和对外界干扰的鲁棒性。自适应控制能够在线估计被控对象的不确定参数,并在控制器中使用估计信息处理不确定性。潜水器的机械手作业系统通常存在不确定性和外界未知干扰的问题,可以采用基于误差方程多项式代数法的自适应控制器完成跟踪控制任务<sup>[4]</sup>。此外,洋流的存在会使潜水器在水下执行任务面临相当大的挑战<sup>[5]</sup>。为了应对潜水器所受的洋流干扰,Aguiar等<sup>[6]</sup>提出了非线性自适应控制器和反步动态控制器以解决潜水器在未知恒定洋流影响下的轨迹跟踪问题;此外,Sun等<sup>[7]</sup>提出了一种结合反步法与自适应控制的级联算法来实现洋流下的轨迹跟踪;除此之外,Dou等<sup>[8]</sup>将模糊控制策略用于飞行器的运动控制,这种控制策略不需要特别精确的数学模型就可以实现对不确定性非线性系统的控制,抗干扰能力较强,但语言规则在一定程度上限制了控制系统的灵敏性和控制性能。

潜水器在执行不同任务时可能会装配不同的设备,因此难以给潜水器系统建立一个通用的精确动态模型<sup>[9]</sup>。而非线性干扰观测器(nonlinear disturbance observer, NDO)能够用于估计这种模型不确定性和外部环境干扰,是处理不确定性和干扰的有效手段<sup>[10]</sup>。文献[11]在水下机器人深度的自适应输出反馈控制设计过程中引入了NDO,较好地提升了系统的动态性能。

一般而言,传统的基于干扰观测器的控制方法通常对潜水器受到的所有干扰进行统一估计,这种方式无法考虑各类干扰的独有性质,因此得到的干扰估计结果不够精确。针对潜水器系统中存在的具有不同来源和不同类型的多源干扰,可以使用将干扰分类估计的方法,由此得到更加准确的干扰估计结果,并提高潜水器的控制性能。针对多源干扰非线性系统的抗干扰问题,文献[12]提出了精细抗干扰控制方案。而且,已经有学者将精细抗干扰控制应用于船舶动力定位系统中<sup>[13]</sup>。

在另一方面,为了提高潜水器的工作性能和故障容错能力,部分潜水器会采用过驱动的设计,即控制输入数多于潜水器的自由度。因此需要将期望的力

和力矩分配给各个推进器,并使得系统能源消耗最小。常用的控制分配算法主要有伪逆法、基于数学规划的优化算法和动态控制分配等。

伪逆法主要适用于推进器不存在矢量布置角度优化时的情况,由于其无法对矢量夹角进行优化,在全自动控制系统中难以使用。基于数学规划的优化算法是把优化问题离散成等效的凸规划序列,对这种序列进行迭代从而求出最优解,此类算法主要适用于小规模的非线性约束的最优化问题。文献[14]中使用了伪逆与二次规划相结合的混合控制分配方法。动态控制分配算法是从控制算法解算的期望值出发,实时分配期望值给各个推进器,使推进器实际输出与期望值尽可能相吻合,这种算法可以在冗余的情况下解决一定约束条件下的最优化分配问题,同时提高系统的容错能力。Yan等<sup>[15]</sup>将动态控制分配方法应用于飞行器的控制中。

本文将过驱动潜水器的约束控制分配问题表示为一个二次规划问题。对于上述最优化问题,本文使用了神经网络对其进行求解。在潜水器控制过程中,推力分配问题需要得到实时计算,神经网络能够通过硬件简单地实现并行与分布处理,因此它适用于解决过驱动潜水器的约束控制分配问题<sup>[16]</sup>。神经网络模型已经成功地应用于极值问题、最大流量问题和最短路径问题<sup>[17]</sup>。

本文设计一种基于干扰观测的反步控制器和神经网络二次规划的推力分配器的双层控制结构,能够准确地估计潜水器所受干扰,解决潜水器过驱动问题,并使潜水器实现期望轨迹的精确跟踪。首先,建立潜水器在洋流影响下的动力学模型,提出潜水器抗干扰和推力分配的问题;然后,设计洋流观测器和非线性干扰观测器以实现对于干扰的精细估计,提出基于干扰观测器的反步控制器,采用神经网络解决约束推力分配问题;最后,通过仿真验证本文方法的有效性和优越性。

## 1 问题描述

潜水器在复杂水下环境运行时,容易受到洋流的影响。同时,潜水器的模型不确定性和未建模动态等因素也会影响潜水器的运行。

### 1.1 潜水器动力学模型

本文在建立潜水器数学模型之前,给出以下常用的假设条件。

**假设1** 洋流速度恒定且无旋。

在洋流影响下的潜水器数学模型<sup>[9]</sup>表示如下:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (1)$$

$$M_{RB}\dot{v} + M_A\dot{v}_r + C_{RB}(v)v + C_A(v_r)v_r + D_a(v_r)v_r + G(\eta) = u + d'. \quad (2)$$

其中:  $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$  表示潜水器在惯性坐标系下的位置和姿态角;  $v = [v_x, v_y, v_z, p, q, r]^T$  表示潜水器在机体坐标系下的线速度和角速度;  $v_r = v - J^{-1}(\eta)v_c$  表示机体坐标系下潜水器与洋流的相对速度,  $v_c = [v_E^T, 0_{1 \times 3}]^T$  表示在惯性坐标系下的洋流速度向量,  $v_E = [v_{Ex}, v_{Ey}, v_{Ez}]^T$  表示洋流在3个坐标轴方向上的速度分量;  $J(\eta) \in R^{6 \times 6}$  表示从机体坐标系到惯性坐标系的旋转矩阵;  $M_{RB}, M_A, C_{RB}, C_A, D_a \in R^{6 \times 6}, G(\eta) \in R^6$  分别表示刚体惯性矩阵、附加惯性矩阵、刚体向心和科里奥利矩阵、流体向心和科里奥利矩阵、阻尼矩阵、机体坐标系下重力和浮力的合力;  $u \in R^6$  表示潜水器所有推进器产生的合作用力 and 力矩;  $d' \in R^6$  表示潜水器受到洋流干扰以外的其他干扰。

将潜水器模型中与洋流相关的部分集中表示, 潜水器的动力学模型可表示为

$$M_{RB}\dot{v} + M_A\dot{v} + C_{RB}(v)v + C_A(v)v + D_a(v)v + G(\eta) = u + d' + d, \quad (3)$$

其中  $d = -(M_A\dot{v}_r - M_A\dot{v}) - (C_A(v_r)v_r - C_A(v)v) - (D_a(v_r)v_r - D_a(v)v)$  表示潜水器所受的洋流干扰。

为了方便控制器的设计, 对潜水器的数学模型进行进一步变换, 得到如下形式的模型:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad \dot{v} = f(\eta, v) + u + D + D'. \quad (4)$$

其中:  $f(\eta, v) = -(M_{RB} + M_A)^{-1}(C_{RB}(v) + C_A(v) + D_a(v))v - (M_{RB} + M_A)^{-1}G(\eta), D = (M_{RB} + M_A)^{-1}d$  表示由洋流引起的干扰,  $D' = (M_{RB} + M_A)^{-1}d'$  表示由其余因素引起的干扰。

### 1.2 潜水器的控制分配模型

本文研究的潜水器具有过驱动特性, 共配置了8个推进器, 以下将建立潜水器的控制分配模型。

设推进系统中第  $i$  个推进器的推力为  $\tau^i$ , 设  $\tau^i$  在机体坐标系下的作用点为  $r^i = [r_x^i, r_y^i, r_z^i]^T$ , 在机体坐标系上的方向为单位向量  $e^i = [e_x^i, e_y^i, e_z^i]^T$ , 推进器  $i$  产生的总力矩为  $Q^i$ , 则第  $i$  个推进器产生的推力和力矩<sup>[18]</sup> 可以表示为

$$u^i = \begin{bmatrix} \tau^i \\ Q^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^i \tau^i \\ (r^i \times e^i) \tau^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^i \\ (r^i \times e^i) \end{bmatrix} \tau^i. \quad (5)$$

8个推进器产生的合作用力 and 力矩为

$$u = \sum_{i=1}^8 u^i =$$

$$\begin{bmatrix} e_x^1 & \dots & e_x^i & \dots & e_x^8 \\ e_y^1 & \dots & e_y^i & \dots & e_y^8 \\ e_z^1 & \dots & e_z^i & \dots & e_z^8 \\ (r^1 + e^1)_x & \dots & (r^i + e^i)_x & \dots & (r^8 + e^8)_x \\ (r^1 + e^1)_y & \dots & (r^i + e^i)_y & \dots & (r^8 + e^8)_y \\ (r^1 + e^1)_z & \dots & (r^i + e^i)_z & \dots & (r^8 + e^8)_z \end{bmatrix} \tau = B\tau. \quad (6)$$

其中: 矩阵  $B \in R^{6 \times 8}$  表示控制分配矩阵, 由推进器的具体布置决定; 向量  $\tau \in R^8$  表示推进器推力向量。

### 1.3 控制器结构

本文设计的潜水器系统的控制结构框图如图1所示。

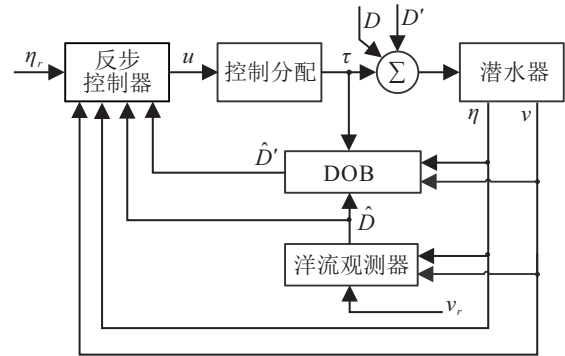


图1 潜水器控制系统结构

图1中的  $\eta_r$  表示潜水器的参考轨迹. 该系统为双层控制结构, 包含了基于干扰观测的反步控制器和神经网络二次规划的推力分配器。

## 2 干扰精细估计

潜水器系统现有的抗干扰控制算法大都以统一的方式处理干扰. 而潜水器在海洋环境下受到多种因素影响. 洋流干扰是对潜水器影响最大的一类, 因此本文专门设计一种洋流观测器估计洋流速度; 此外设计NDO估计潜水器受到的其余干扰。

### 2.1 洋流观测器

洋流是影响潜水器在水下运动的重要因素之一, 为了得到潜水器所处海洋环境中洋流的速度, 并消除洋流干扰给潜水器运动带来的影响, 本文设计一种洋流观测器, 专门用于估计由洋流引起的干扰, 以得到更加准确的干扰估计结果. 该洋流观测器结构框图如图2所示。

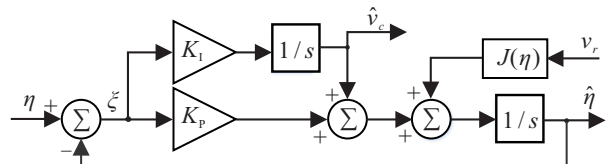


图2 洋流观测器结构

洋流估计器设计为如下状态空间形式:

$$\dot{\hat{v}}_c = K_I \xi, \dot{\xi} = -\hat{v}_c - K_P \xi + v_c. \quad (7)$$

其中:  $\hat{v}_c$  表示洋流的估计值;  $\xi = \eta - \hat{\eta}$  表示潜水器位置估计误差,  $\hat{\eta}$  表示潜水器位置估计值,  $K_P$  和  $K_I$  表示 PI 控制器参数, 为正定对角矩阵. 将洋流估计值  $\hat{v}_c$  代入模型(4)中  $D$  的表达式, 即可得到洋流干扰估计值  $\hat{D}$ .

**引理 1** 洋流观测器(7)的输出  $\hat{v}_c$  能够准确估计洋流速度  $v_c$ . 此时, 干扰估计值  $\hat{D}$  将准确收敛于潜水器所受的实际洋流干扰  $D$ .

### 2.2 非线性干扰观测器

为了消除洋流干扰以外其他干扰对潜水器的影响, 本文引入了非线性干扰观测器对其他干扰进行估计. 假设潜水器所受其他干扰  $D'$  相对于干扰观测器的动态特性变化缓慢, 即  $\dot{D}' = 0$ . 因此, 本文的非线性干扰观测器<sup>[19]</sup>设计如下:

$$\dot{z} = -Lz - L(f(\eta, v) + B\tau + \hat{D} + p), \hat{D}' = z + p. \quad (8)$$

其中:  $\hat{D}'$  表示干扰  $D'$  的估计值,  $z$  表示非线性干扰观测器的内部状态,  $p$  表示待设计非线性向量函数;  $L = \text{diag}\{l_1, l_2, \dots, l_6\}$  表示观测器的增益矩阵. 由文献[19]可知, 观测器的输出  $\hat{D}'$  能够准确估计干扰  $D'$ .

## 3 抗干扰运动控制器设计

本文基于干扰估计的结果, 针对潜水器系统(4), 采用反步法设计潜水器的运动控制器<sup>[20]</sup>如下.

定义潜水器系统跟踪误差为  $e_1 = \eta - \eta_d$ , 得到开环误差特性

$$\dot{e}_1 = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d = J(\eta)v - \dot{\eta}_d. \quad (9)$$

设计第 1 个子系统的虚拟控制量为

$$\alpha_1 = -c_1 J^{-1}(\eta)e_1 + J^{-1}(\eta)\dot{\eta}_d. \quad (10)$$

定义误差  $e_2 = v - \alpha_1$ , 得到开环误差特性

$$\dot{e}_2 = f(\eta, v) + u + D + D' - \dot{\alpha}_1. \quad (11)$$

设计控制律  $u_c$  为

$$u_c = -f(\eta, v) - \hat{D} - \hat{D}' + \dot{\alpha}_1 - J^T(\eta)e_1 - c_2 e_2, \quad (12)$$

其中  $c_1 > 0, c_2 > 0$  为可调整参数.

## 4 神经网络推力分配

本文设计的潜水器推力分配以推力二次优化为目标, 考虑了推进器推力饱和约束. 本文设计的优化推力分配代价函数<sup>[21]</sup>如下:

$$F = \tau^T W_1 \tau + s^T W_2 s, \quad (13)$$

约束条件为

$$\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}, s = u_c - B\tau. \quad (14)$$

其中:  $W_1, W_2$  表示权重矩阵且均为非负定对角矩阵,  $s$  表示实际控制输出量  $B\tau$  与期望输出量  $u_c$  的误差,  $\tau_{\max}$  和  $\tau_{\min}$  分别表示推进器推力的上下限.

以上非线性规划问题可以转化为如下二次规划形式:

$$\min F = \tau^T H \tau + 2c^T \tau + k; \text{ s.t. } g(\tau) \leq 0. \quad (15)$$

其中

$$H = W_1 + B^T W_2 B; c^T = -u_c^T W_2 B;$$

$$k = u_c^T W_2 u_c;$$

$$g(\tau) = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \tau - \begin{bmatrix} T_{\max} \\ -T_{\min} \end{bmatrix},$$

$$P = \text{diag}\{1, \dots, 1\}, Q = \text{diag}\{-1, \dots, -1\},$$

$$T_{\max} = [\tau_{\max}, \dots, \tau_{\max}], T_{\min} = [\tau_{\min}, \dots, \tau_{\min}].$$

对于凸非线性规划问题(15), 有一个给定的初始点  $y_0 = [\tau_0^T, h_0^T]^T$ , 可以使用如下神经网络<sup>[17]</sup>求解:

$$\frac{d\tau}{dt} = -(\nabla F + \nabla g^T(h + g)^+),$$

$$\frac{dh}{dt} = (h + g)^+ - h. \quad (16)$$

其中:  $h$  表示神经网络的内部状态变量,  $(h + g)^+ = [(h_1 + g_1)^+, (h_2 + g_2)^+, \dots, (h_8 + g_8)^+]$ ,  $(h_k + g_k)^+ = \max\{h_k + g_k, 0\}, k = 1, 2, \dots, 8$ . 其结构框图如图 3 所示.

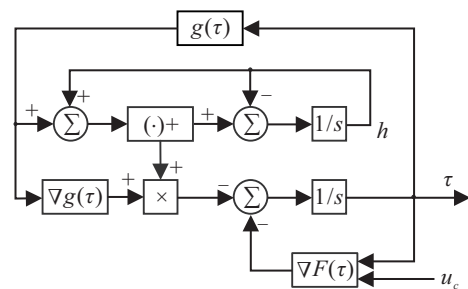


图 3 神经网络结构

将式(16)简化表示为

$$\frac{dy}{dt} = \delta \psi(y), y(t_0) = y_0. \quad (17)$$

其中:  $y = [\tau^T, h^T]^T$ ;  $\delta$  表示比例参数, 将影响神经网络的收敛速率. 式(17)中的  $\psi(y)$  表示如下:

$$\psi(y) = \begin{bmatrix} -(\nabla F + \nabla g^T(h + g)^+) \\ (h + g)^+ - h \end{bmatrix}. \quad (18)$$

上述神经网络的稳定性和收敛性分析已在文献[17]中详细讨论. 基于神经网络的输出即可得到过驱动潜水器的推力分配结果.

## 5 仿真结果

为了验证所设计的潜水器控制方案的有效性,本文设计了仿真实验. 仿真实验中使用的潜水器模型参数可见文献[22].

仿真实验中的控制方案参数如下:干扰观测器参数  $L = \text{diag}\{2, \dots, 2\}$ ; 控制增益  $c_1 = 1, c_2 = 10$ ; 洋流观测器参数分别为  $K_I = \text{diag}\{1, \dots, 1\}, K_P = \text{diag}\{2, \dots, 2\}$ ; 神经网络比例参数  $\delta = 1$ .

潜水器的期望轨迹设计为半径12m的螺旋上升曲线,能够较全面地检测潜水器的运行性能,包括轨迹跟踪的准确性,抗干扰能力等. 其轨迹方程为

$$\begin{cases} x_d(t) = 12 \sin(2\pi t/160), \\ y_d(t) = 12 \sin(2\pi t/160 + \pi/2), \\ z_d(t) = 0.1t; \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \varphi_d(t) = 0, \\ \theta_d(t) = 0, \\ \psi_d(t) = 2\pi t/160. \end{cases} \quad (20)$$

在仿真过程中,潜水器的初始位置与姿态角为  $[0, 10, 0, 0, 0, 0]^T$ ,潜水器所处的水下环境中洋流速度为  $v_E = [15, 8, 3]^T$ ,所受其他干扰为正弦信号  $D' = 50 \sin(t/40)$ .

为了突出设计方法的优越性,本文将设计两组对照方法:第1组使用干扰观测器(disturbance observer, DOB)统一估计洋流干扰与其他干扰,即将潜水器模型(4)中的  $D$  与  $D'$  看作一个整体  $D_t = D + D'$ ,并针对  $D_t$  使用如2.2节的方法设计干扰观测器;第2组使用伪逆矩阵(pseudo-inverse)进行推力分配.

第1组对比实验的仿真结果如图4~图6所示.

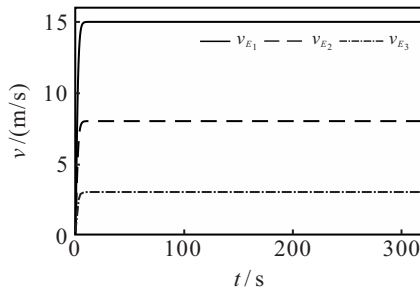


图4 洋流估计结果

图4为洋流观测器得到的洋流速度估计结果,可以看出洋流观测器能够准确估计洋流速度.

图5所示为整体的干扰估计结果与实际总干扰  $D_t$  之间的误差,图5中  $D_{ti}$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) 表示总干扰  $D_t$  的第  $i$  个分量,由图5可知,本文的干扰估计方法对潜水器所受干扰的估计更加快速准确.

图6是潜水器的位置跟踪效果在三维坐标系中

的表现,可以看出,本文设计的方法能够得到相对较好的轨迹跟踪结果. 由于轨迹跟踪曲线重合度较高,表1给出了轨迹跟踪误差的均方根值.

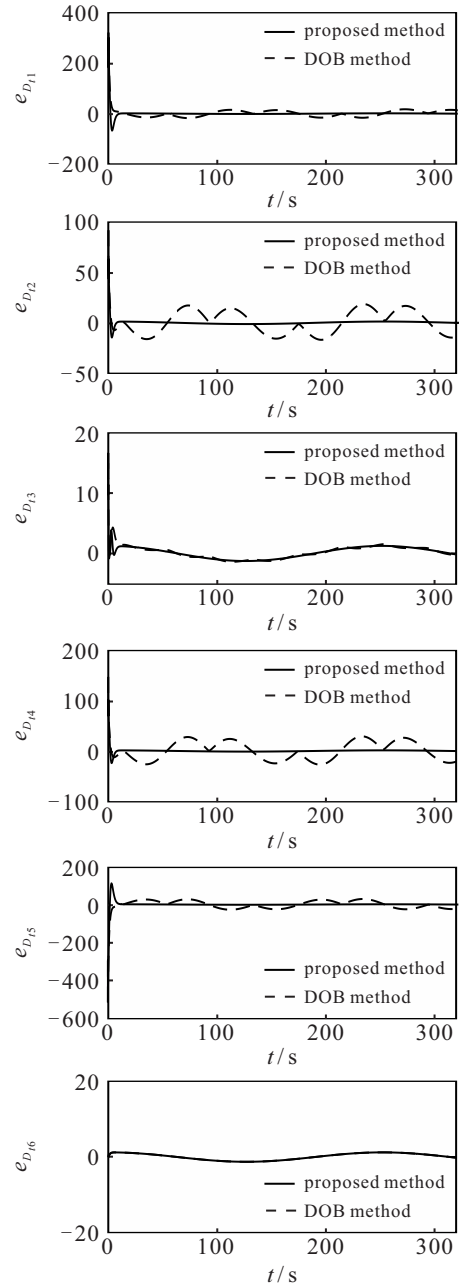


图5 总干扰估计误差

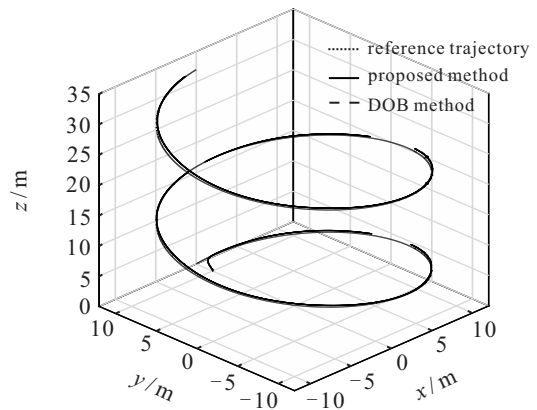


图6 三维跟踪

表1 轨迹跟踪误差均方根

控制方法	$(e_x)_{RMS}/m$	$(e_y)_{RMS}/m$	$(e_z)_{RMS}/m$	$(e_\varphi)_{RMS}/rad$	$(e_\theta)_{RMS}/rad$	$(e_\psi)_{RMS}/rad$
本文方法	0.2789	0.1589	0.0177	0.0086	0.0161	0.0009
DOB方法	0.2877	0.1673	0.0185	0.0194	0.0239	0.0010

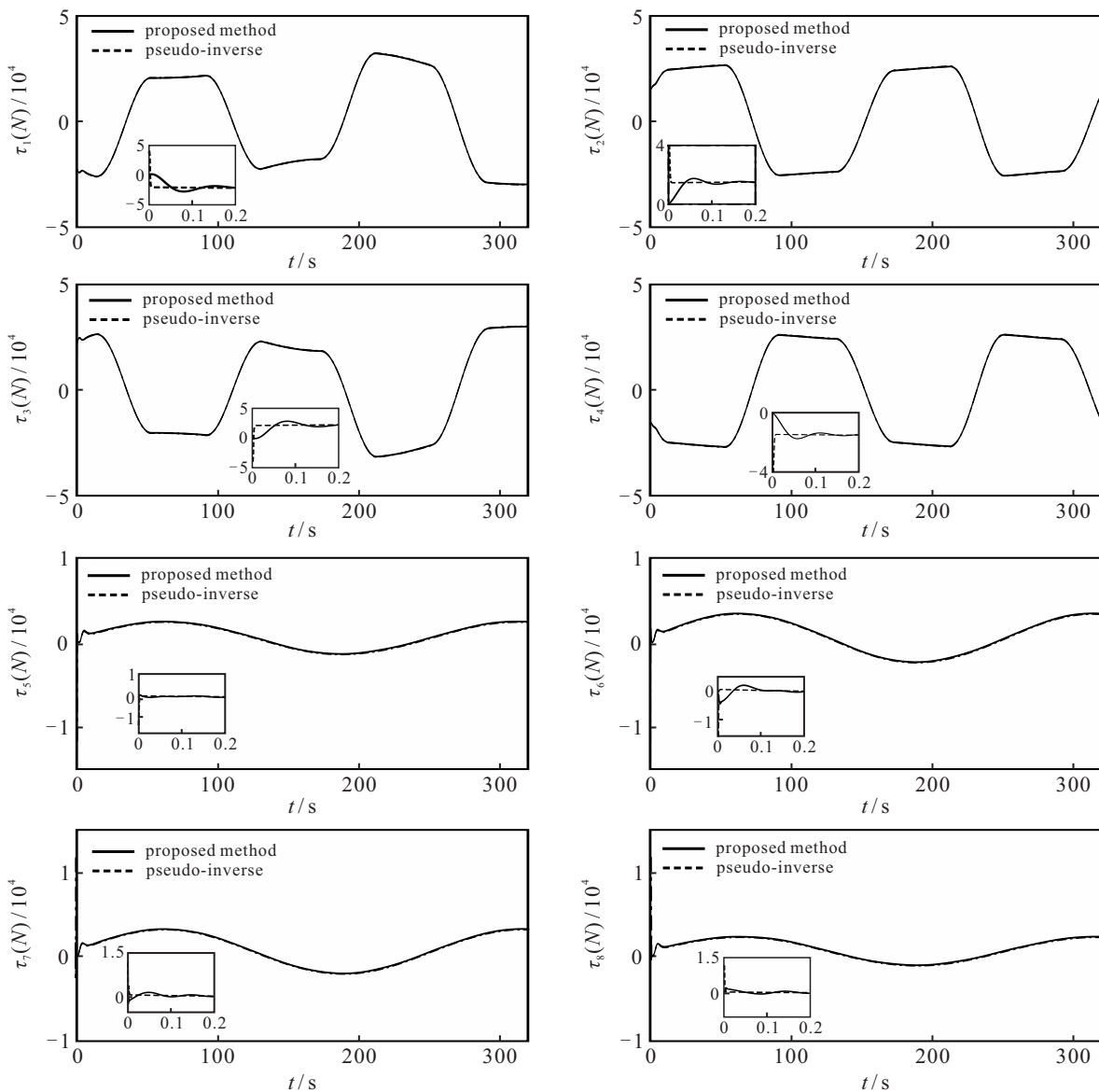


图7 各推进器响应

由表1可直观地看出:在本文方法下,跟踪误差要小于对比方法.第2组对比实验的仿真结果如图7所示.

图7表示的是潜水器各个推进器的推力,从图7中可以看出,伪逆矩阵推力分配方法得到的推力分配结果中推进器推力会在初始时刻超出推力限制,且有较大的变化速率,而本文使用的基于神经网络的推力分配方法不会超限.

综上所述,本文设计的干扰观测方法能够快速准确地估计潜水器系统所受的干扰.对照组使用干扰观测器统一观测潜水器洋流干扰和其他干扰时,干扰

估计的结果存在较大的误差,从而导致跟踪参考轨迹时也出现相对较大的跟踪误差.在所设计的神经网络二次规划推力分配方法作用下,潜水器推进器能够在推力限幅内运行,并准确跟踪参考轨迹.在使用伪逆矩阵进行推力分配时,推进器推力会有较严重的超限情况,且有很大的推力变化速率.

### 6 结论

本文设计了一种基于干扰观测的反步控制器和神经网络二次规划的推力分配器的双层控制结构,使潜水器能够更加准确地估计所受到的外界干扰,并使推进器在推力限制范围内工作.仿真结果验证了所

提出设计方法的有效性和优越性。

### 参考文献(References)

- [1] Cui W. Development of the jiaolong deep manned submersible[J]. Marine Technology Society Journal, 2013, 47(3): 37-54.
- [2] Fang X, Liu F, Gao X. Full-order sliding-mode control of manned submersible in the presence of lumped disturbances[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(11): 1626-1634.
- [3] Yang J H, Liu W D. Adaptive fuzzy sliding mode trajectory tracking control for remotely operated underwater vehicles[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(8): 2447-2450.
- [4] Huang Q H, Wang C J, Liu X H, et al. Research on adaptive control technology of underwater manipulator[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(24): 80-82.
- [5] Gan W Y, Zhu D Q, Hu Z, et al. Model predictive adaptive constraint tracking control for underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9): 7829-7840.
- [6] Aguiar A P, Pascoal A M. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents[C]. Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas, 2002: 2105-2110.
- [7] Sun B, Mei M, Zhu D Q. A cascaded adaptive UUV tracking control design with ocean current[C]. The 34th Chinese Control Conference (CCC). Hangzhou, 2015: 4280-4285.
- [8] Dou L Q, Mao Q, Su P H, et al. Adaptive fuzzy control for air-breathing hypersonic vehicle with variable geometry inlet based on nonlinear disturbance observer[J]. Control and Decision, 2019, 34(8): 1672-1680.
- [9] Chu Z Z, Zhu D Q, Yang S X. Observer-based adaptive neural network trajectory tracking control for remotely operated vehicle[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 28(7): 1633-1645.
- [10] 梁利华, 王保华, 贾鹤鸣. 基于干扰观测器的SWATH船运动非线性预测控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(3): 431-436.  
(Liang L H, Wang B H, Jia H M. Nonlinear predictive control of SWATH ship motions with disturbance observer[J]. Control and Decision, 2014, 29(3): 431-436.)
- [11] 张利军, 齐雪, 赵杰梅, 等. 垂直面欠驱动自治水下机器人定深问题的自适应输出反馈控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(10): 1371-1376.  
(Zhang L J, Qi X, Zhao J M, et al. Depth-keeping control for autonomous underwater vehicle in vertical plane using adaptive output feedback controller[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(10): 1371-1376.)
- [12] Wei X, Zhang H, Guo Z, et al. Elegant anti-disturbance control for uncertain discrete-time stochastic systems[C]. The 27th Chinese Control and Decision Conference. Qingdao, 2015: 2652-2657.
- [13] 魏新江, 魏永丽, 张慧凤. 船舶动力定位系统的精细抗干扰控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2593-2599.  
(Wei X J, Wei Y L, Zhang H F. Elegant anti-disturbance control for dynamic positioning system of ships[J]. Control and Decision, 2022, 37(10): 2593-2599.)
- [14] 俞建成, 张艾群, 王晓辉. 7000米载人潜水器推进器故障容错控制分配研究[J]. 机器人, 2006, 28(5): 519-524.  
(Yu J C, Zhang A Q, Wang X H. Research on thruster fault tolerant control allocation of a 7000m manned submarine[J]. Robot, 2006, 28(5): 519-524.)
- [15] Yan Y, Yang J, Liu C, et al. On the actuator dynamics of dynamic control allocation for a small fixed-wing UAV with direct lift control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 28(3): 984-991.
- [16] Chen M. Constrained control allocation for overactuated aircraft using a neurodynamic model[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(12): 1630-1641.
- [17] Nazemi A. Solving general convex nonlinear optimization problems by an efficient neurodynamic model[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(2): 685-696.
- [18] Omerdic E, Roberts G. Thruster fault diagnosis and accommodation for open-frame underwater vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(12): 1575-1598.
- [19] Chen W H, Ballance D J, Gawthrop P J, et al. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 932-938.
- [20] Junaid M R, Beebi L M, Ashima C R. Backstepping and adaptive backstepping control on robotic ARM[C]. 2015 International Conference on Control Communication & Computing India (ICCC). Trivandrum, 2015: 1-6.
- [21] Johansen T A, Fossen T I, Berge S P. Constrained nonlinear control allocation with singularity avoidance using sequential quadratic programming[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(1): 211-216.
- [22] Sun B, Zhu D Q, Yang S X. A bioinspired filtered backstepping tracking control of 7000-m manned submarine vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3682-3693.

### 作者简介

浦吉铭(1997—), 男, 硕士生, 从事深海载人潜水器的抗干扰控制方法和运动控制的研究, E-mail: 6201924130@stu.jiangnan.edu.cn;

方星(1987—), 男, 副教授, 博士, 从事抗干扰控制方法、深海潜水器/水下运载体的运动控制等研究, E-mail: xingfang@jiangnan.edu.cn;

刘飞(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事先进控制理论及应用、工业系统监控与诊断等研究, E-mail: fliu@jiangnan.edu.cn;

高翔(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 从事载人潜水器信号处理、状态监控与故障诊断等研究, E-mail: gaox@ndsc.org.cn.